ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 631.3.02:519.876.5

О.А. ПОЛУШКИН

БЕЗДЕФЕКТНАЯ НАСТРОЕННАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ

На основе моделирования процесса настроенной обработки изделий с помощью негауссового закона распределения значений их размеров, полученных такой обработкой, обоснованы настроечные параметры технологического процесса, гарантирующие отсутствие дефектов обработки (исправимого и неисправимого брака) и потому исключающие контрольные операции.
Ключевые слова: *настроенная обработка, моделирование, технологические параметры, бездефектное производство*

Введение. Для машин массового и серийного производства, к которым, в частности, относятся сельскохозяйственные машины, характерно широкое использование настроенной автоматизированной размерной обработки деталей, обеспечивающей наибольший эффект в снижении трудозатрат и обеспечении качества изделия. В работе [1] обосновано, что законом распределения случайных значений x размера обработанной таким образом поверхности изделий будет не закон Гаусса или иные типовые законы распределения и их композиции, как это принималось до настоящего времени, а динамический закон

$$f(x) = \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_0^T \exp\left[-\frac{\left(x - m + \gamma I(t)\right)^2}{2\sigma^2}\right]dt\,, \qquad (1)$$

в котором T – стойкость инструмента; σ – среднее квадратическое отклонение, определяющее технологическую точность оборудования, используемого при обработке; m – размерный параметр настройки инструмента; γ – параметр, определяющий тип обрабатываемой поверхности детали (γ=-1 при обработке охватываемой поверхности; γ=1 при обработке охватывающей поверхности); $I(t)$ – закон изменения во времени размерного износа инструмента. Динамический закон получен рассмотрением размерного износа инструмента не как случайного, а как закономерного фактора обработки, и, поскольку все его параметры являются параметрами технологического процесса обработки, его следует рассматривать как математическую модель процесса настроенной размерной обработки. В работе [2] представлена методика апостериорной идентификации всех параметров модели (1) по результатам пробных реализаций процесса настроенной размерной обработки поверхности изделия с динамической настройкой технологической системы. Это делает модель (1) процесса полностью определенной и позволяет её использовать для решения задач управления качеством и эффективностью этого процесса. Решение одной из таких задач – обоснование значения m настроечного параметра, обеспечивающего наибольшую стойкость T инструмента при создании гарантии непревышения заданной доли B брака обработки и минимизации затрат времени на проведение контрольных

операций, - представлено ниже. Хотя методология решения этой задачи разработана, однако использование модели (1) для её решения представляет новизну, повышает надежность и достоверность результатов расчета.

Решение задачи. Исходным для решения поставленной задачи является требуемое чертежом изделия расположение поля *δ* допуска относительно номинального размера *X* обрабатываемой поверхности, обобщенно описываемое как ограничение области допустимых значений случайного размера *x:*

$$[x] = X_{EI(ei)}^{ES(es)}, \qquad (2)$$

где $ES(es)$, $EI(ei)$ – верхнее и нижнее предельные отклонения значения *x* для отверстия (вала) соответственно [3].

Минимальное и максимальное допустимые значения *x* определяются соотношениями:

$$a=X+EI(ei), \qquad b=X+ES(es) \qquad (3)$$

соответственно, где a и b – границы поля допуска

$$\delta=b-a=ES(es)-EI(ei). \qquad (4)$$

Полагаем, что закон *I(t)* изменения размерного износа инструмента является непрерывным и дифференцируемым на всем интервале времени $0\le t\le T$. Реально это сводится к распространенному в практике случаю, когда рост размерного износа инструмента не приводит к его поломке на протяжении всего периода *T* его стойкости. При этом критическое значение $I_{кр}=I(T)$ износа должно ограничиваться требованиями к точности обрабатываемой поверхности изделия, т.е. значением *δ*, и задаваемой долей *B* брака обработки, допустимой по условиям производства и характеризующейся площадью кривой распределения *f(x)* за границами *a* и *b* поля допуска,

$$B = 1-\int_a^b f(x)dx = 1-\frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_a^b\int_0^T \exp\left[-\frac{(x-m+\gamma I(t))^2}{2\sigma^2}\right]dxdt. \qquad (5)$$

Подразделяя брак на исправимый $B_и$ и неисправимый $B_н$:

$$B=B_и+B_н, \qquad (6)$$

и организуя производство так, чтобы неисправимый брак практически отсутствовал, будем иметь, как это принято в [4], $0{,}5B_{нmax}\le B_н\le B_{нmax}=0{,}00135$, что позволяет в дальнейшем управлении качеством технологического процесса обработки требовать выполнения условия

$$B-B_{нmax}\le B_и\le B-0{,}5B_{нmax}, \qquad (7)$$

определяя в качестве исходного для решения задачи лишь значение *B* допустимой доли брака обработки.

Рассматривая в соответствии с [2] отдельно процессы обработки охватываемой (γ=-1) и охватывающей (γ=1) поверхностей, определяем доли исправимого ($B_и$) и неисправимого ($B_н$) брака как

$$\gamma=-1: \quad B_н=\int_{-\infty}^{a} f(x)dx, \; B_и=\int_b^{\infty} f(x)dx;$$

$$\gamma=1: \quad B_н = \int_b^{\infty} f(x)dx\,, \quad B_и = \int_{-\infty}^{a} f(x)dx\,.$$

Подстановкой (1) последние выражения позволяют сформулировать системы уравнений

- для γ=-1:

$$\left.\begin{aligned} И_1 &= \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{a}\int_0^{T}\exp\left[-\frac{(x-m-I(t))^2}{2\sigma^2}\right]dxdt = B_н,\\ И_2 &= \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{b}^{\infty}\exp\left[-\frac{(x-m-I(t))^2}{2\sigma^2}\right]dxdt = B_и; \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

- для γ=1:

$$\left.\begin{aligned} И_1 &= \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{b}^{\infty}\exp\left[-\frac{(x-m+I(t))^2}{2\sigma^2}\right]dxdt = B_н,\\ И_2 &= \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{a}\exp\left[-\frac{(x-m+I(t))^2}{2\sigma^2}\right]dxdt = B_и. \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

В каждой из систем (8),(9) известными (определенными по результатам отмеченной выше идентификации параметров модели (1) процесса обработки) являются $I(t)$, σ, а также значения $B_{нmax}$=0,00135, $B_{нmin}$=0,5$B_{нmax}$ и соответствующие им значения $B_{иmin}=B-B_{нmax}$, $B_{иmax}= B-B_{нmin}$, определяемые задаваемым значением B. Вместе с тем, каждая из этих систем содержит два неизвестных параметра рассматриваемого процесса настроенной размерной обработки – значения m и T, которые и определяются решением системы (8) или (9) в зависимости от типа обрабатываемой поверхности (от значения γ).

Заметим, что решение системы (8) или (9) необходимо производить дважды. Сначала в правой части системы полагается $B_н=B_{нmax}$, $B_и=B_{иmin}$ и решением находятся значения m и T, им отвечающие. Затем в правой части системы полагается $B_н=B_{нmin}$, $B_и=B_{иmax}$ и её решением находятся новые значения настроечного параметра инструмента m_1 и его стойкости T_1. При этом для γ=-1 будем иметь $m< m_1$, $T>T_1$, а для γ=1 - $m> m_1$, $T>T_1$. Такой расчет позволяет найти допуски на параметр m размерной настройки инструмента (δ_m) и на значение T его стойкости (δ_T), определяемые как

$$\delta_m = |m - m_1|\,, \qquad \delta_T = |T - T_1|\,. \qquad (10)$$

Обеспечение при обработке охватываемой поверхности (γ=-1) размерной настройки инструмента с точностью $m\begin{pmatrix}\delta_m\\ 0\end{pmatrix}$ гарантирует выполнение условия $B_н \le B_{нmax}$, а работа оборудования в течение машинного времени $t= T_1\begin{pmatrix}\delta_T\\ 0\end{pmatrix}$ гарантирует не только практическое отсутствие неисправимого брака, но и долю $B_и$ исправимого брака, удовлетворяющую условию (7) при заданном для расчетов значении B. При

обработке охватывающей поверхности (γ=1) настройка инструмента с точностью $m\begin{pmatrix} 0 \\ -\delta_m \end{pmatrix}$ также гарантирует практическое отсутствие неисправимого брака и долю исправимого брака, удовлетворяющую условию (7) при осуществлении обработки изделий в течение $t=T_1\begin{pmatrix} \delta_T \\ 0 \end{pmatrix}$ машинного времени обработки.

Практическая реализация размерной настройки инструмента с обоснованной выше точностью позволяет в течение времени $t=T_1$ работы инструмента исключить контрольные операции обработанных за это время изделий. Эти операции необходимо использовать выборочно в течение интервала времени $T_1<t\leq T$ и постоянно при $t>T$, фиксируя этим момент появления исправимого брака и определяя тем самым необходимость очередной размерной настройки инструмента с его заменой или ремонтом. Такая организация контроля обработанных изделий позволяет практически исключить не только неисправимый, но и исправимый брак обработки, обеспечивая тем самым качество и подъем эффективности производства.

Отмеченное выше решение каждой из систем (8), (9) может быть осуществлено лишь численным методом на ЭВМ. На рис.1 представлена блок-схема алгоритма численного решения этих систем (для γ=-1 и γ=1), из пояснений к которым отметим следующее:

- вводимые в блоке 2 исходные для расчета, помимо поясненных выше значений $\gamma,\sigma,a,b,$ содержат общую долю B брака, а также зависимость $t(I)$, обратную зависимости $I(t)$;

- вводимое в блоке 3 вспомогательное значение Δ=1 предназначено для осуществления перехода в расчетах при получении в блоках 22,33 приращения $\Delta=\Delta+1$ с помощью условных переходов 20,31;

-условный переход 4 предопределяет использование различных зависимостей для определения первого приближения значения m при обработке охватываемых (γ=-1) и охватывающих (γ=1) поверхностей;

- в блоках 7…10 производится расчет первого приближения значения T;

- условный переход в блоке 11 предопределяет расчеты для различных значений γ. При этом блоки 12…19 представляют итерационный расчет значений m и T при заданных в блоках 2,3 значениях $B_н$ и B для случая обработки охватываемой поверхности. Блоки 23…30 осуществляют тот же расчет для обработки охватывающей поверхности;

- при выполнении условия блока 20 найденные при γ=-1 значения m и T выдаются на печать в блоке 21 и далее в блоке 22 дается приращение значению Δ, сокращается вдвое значение $B_н$ и для этого значения расчеты по блокам 12…19 проводятся повторно, определяя новые значения m и T, соответствующие новому значению $B_н$. После этих расчетов условие блока 20 не выполняется и найденные значения m и T приравниваются в блоке 34 значениям m_1 и T_1, которые выдаются на печать в блоке 35;

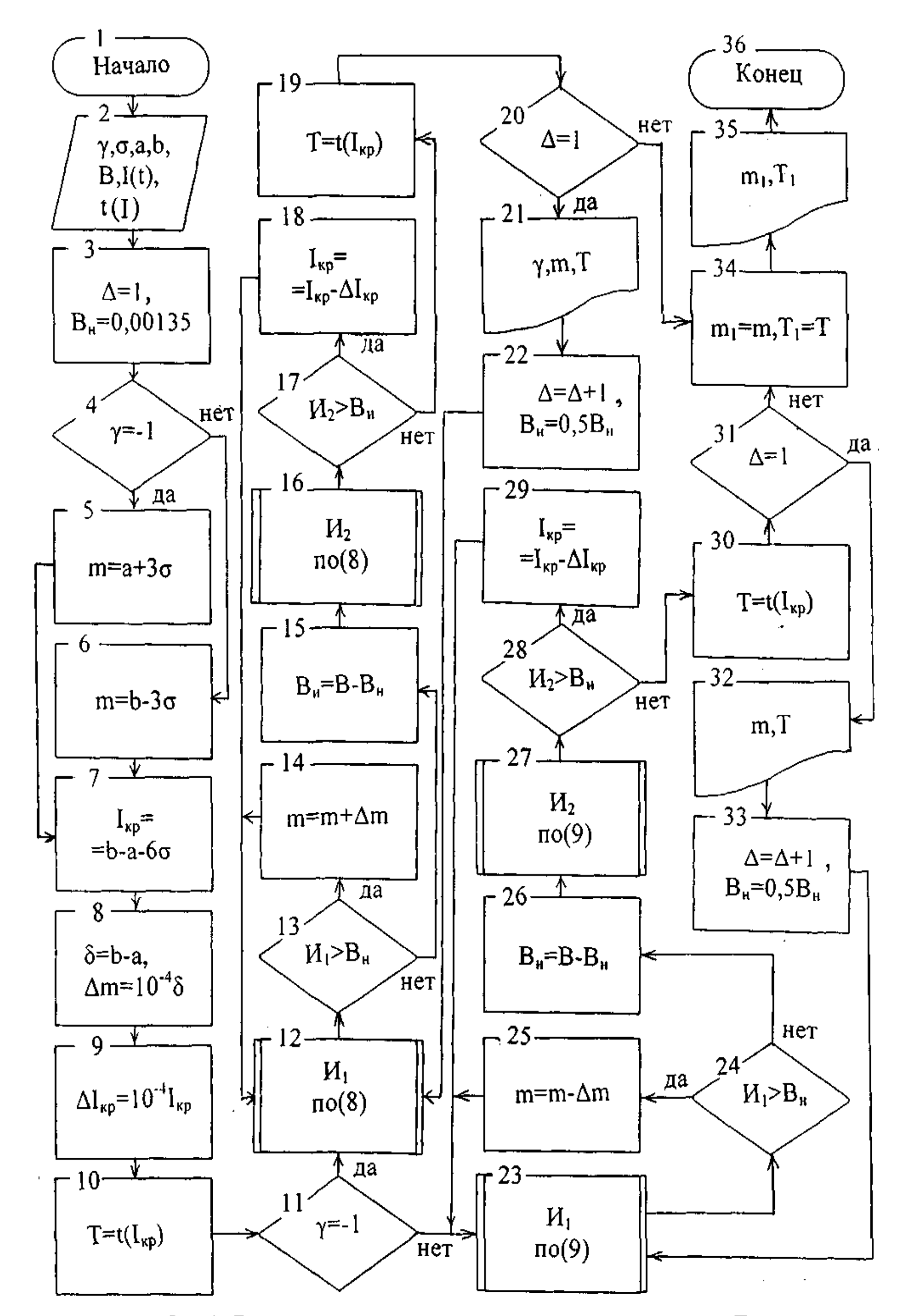


Рис.1. Блок-схема расчета управляемых параметров *m* и *T* модели процесса настроенной размерной обработки

- при выполнении условия блока 31 найденные при γ=1 значения *m* и *T* выдаются на печать в блоке 32 и далее в блоке 33 дается приращение значению Δ, сокращается вдвое значение $B_н$ и расчеты для нового значения $B_н$ повторятся в блоках 23…30, определяя новые значения *m* и *T*. После этих расчетов условие блока 31 не выполняется, реализуется

операция блока 34, и в блоке 35 на печать выдаются значения m_1, T_1 для γ=1;

- блоком 36 завершается проведение расчетов.

С помощью описанной выше и представленной на рис.1 блок-схемы в системе программирования Turbo Pascal (версия 7.0) разработана программа для ЭВМ, с проведением расчетов по которой на печать выдаются значения m, T, m_1, T_1, соответствующие задаваемым исходным. С использованием (10) и следующих за ним пояснений эти результаты позволяют обосновать как значения, так и допуски настроечного параметра m и стойкости T инструмента при проведении любой настроенной размерной обработки изделия с обеспечением гарантии практического отсутствия неисправимого брака и задаваемой доли B общего брака обработки.

Изложенная выше методика может использоваться для управления качеством процесса настроенной размерной обработки поверхности изделия лишь в случае, когда

$$\delta > 6\sigma, \qquad (11)$$

т.е. когда технологическая точность используемого при обработке оборудования адекватна точности размера обрабатываемой на этом оборудовании поверхности изделия.

Обсуждение результатов. По отмеченной методике с использованием разработанной программы были произведены расчеты и решены задачи управления качеством процесса настроенной размерной обработки зенкерованием посадочного отверстия $Ø40H12\begin{pmatrix}250\\0\end{pmatrix}$ шкива привода измельчителя зерноуборочного комбайна «Дон-1500Б». Хотя в рассматриваемом примере обосновываемые значения m и δ_m зенкера имеют смысл исполнительного размера и допуска на изготовление инструмента, в дальнейшем изложении под этими обозначениями будем понимать обобщенный настроечный параметр инструмента и его допуск. Это полагаем допустимым, так как операция зенкерования полностью отвечает смыслу настроенной размерной обработки изделия.

Предварительный анализ процесса этой обработки с технологическими нормативами и условиями её реализации на заводе «Сельмаш-Калитва» позволил (с использованием [2]) идентифицировать параметры математической модели (1) точности этого процесса и представить её в виде

$$f(x) = \frac{1}{435 \cdot 8{,}1\sqrt{2\pi}} \int_0^{435} \exp\left[-\frac{\left(x - 248 + 4{,}4 \cdot 10^{-5} t^{2{,}56}\right)^2}{2 \cdot 8{,}1^2}\right] dt, \qquad (12)$$

где, в соответствии с (1), T=435мин – обоснованная по условиям критического износа и принятая на заводе стойкость зенкера, σ=8,1мкм – технологическая точность оборудования (станок и приспособление), используемого при обработке; m=248мкм – настроечный параметр инструмента, определяющий, что размер нового зенкера составляет *Ø40,248*мм; $I(t)=4{,}4 \cdot 10^{-5} \cdot t^{2{,}56}$ – закон изменения во времени размерного износа зенкера (в мкм при t – в мин); γ=1 – обработка охватывающей поверхности.

Анализ модели (12) и исходных данных, использованных для идентификации её параметров, позволил установить:

- существующий на заводе процесс настроенной размерной обработки отверстия приводного шкива измельчителя, описываемый моделью (12), приводит к появлению долей неисправимого ($B_н$) и исправимого ($B_и$) брака, определенных как

$$B_н = \int_b^{\infty} f(x)dx = 0{,}127, \qquad B_и = \int_{-\infty}^{a} f(x)dx = 0{,}022.$$

Это обеспечивает значение общей доли брака обработки B=0,149, заставляя осуществлять контроль размера отверстий всех обработанных шкивов с помощью проходного и непроходного калибров;

-идентификация параметров модели (12) осуществлена по результатам обработки за T=435 мин машинного времени отверстий 500 шкивов. Замерами установлено, что 62 из этих шкивов имеют размер больший, чем 40,250 мм, а 13 шкивов – размер меньший, чем 40,000 мм. Это позволило установить де-факто долю неисправимого брака $B_н^ф = 0{,}124$ и долю исправимого брака $B_и^ф = 0{,}026$. Хорошее совпадение расчетных ($B_н$, $B_и$) и фактических ($B_н^ф$, $B_и^ф$) долей брака настроенной размерной обработки отверстия шкивов характеризует высокий уровень адекватности модели (12) реальному процессу обработки;

- при границах a=0, b=250 мкм поля допуска δ=250 мкм рассматриваемый процесс обработки удовлетворяет условию (11) использования разработанной методики управления качеством этого процесса.

Результаты практической реализации предложенной методики. Реализуя решение задачи управления качеством рассматриваемого процесса настроенной размерной обработки отверстия шкива привода измельчителя комбайна «Дон-1500Б» с целью практической ликвидации как неисправимого, так и исправимого брака обработки по разработанной программе провели расчет на ЭВМ параметров m и T модели процесса обработки, соответствующих следующим значениям исходных: γ=1; σ=8,1 мкм; a=0; b=250 мкм; B=0,0027; $I(t)=4{,}4\cdot10^{-5}\cdot t^{2,56}$; $t(I)=50{,}324I^{0,391}$. В результате расчетов получено: m=226 мкм, T=394,5 мин, m_1=225 мкм, T_1=391,5 мин, что с использованием (10) и следующих за ним пояснений позволяет найти $m = 226\begin{pmatrix}0\\-1\end{pmatrix}$ мкм, $T = 391{,}5\begin{pmatrix}3\\0\end{pmatrix}$ мин. Обеспечивая наибольшую гарантию отсутствия брака обработки, положили m=225 мкм, T=391,5 мин, и априорная модель предлагаемого процесса обработки, которая должна проводиться зенкером с начальным размером *Ø40,225* мм в течение машинного времени T=391,5 мин, за которое осуществляется обработка отверстий 450 шкивов, описывается как

$$f(x) = \frac{1}{391{,}5\cdot 8{,}1\cdot\sqrt{2\pi}}\int_0^{391,5}\exp\left[-\frac{\left(x-225+4{,}4\cdot10^{-5}t^{2,56}\right)^2}{2\cdot 8{,}1^2}\right]dt. \tag{13}$$

Прогнозируя по этой модели брак обработки аналогично тому, как это сделано выше для модели (12), нашли $B_н$=0,00129, $B_и$=0,00134, что

свидетельствует о практическом отсутствии как неисправимого, так и исправимого брака обработки отверстий шкива привода измельчителя комбайна «Дон-1500Б» при осуществлении обработки с технологическими параметрами *m* и *T*, обоснованными выше и заложенными в модели (13).

С найденными значениями технологических параметров настроенной размерной обработки (начальный размер зенкера *Ø40,225* мм; обусловленная требованиями размерного износа стойкость зенкера *T*=391,5 мин) на заводе «Сельмаш-Калитва» реализовали процесс обработки 450 шкивов. На рис.2 представлена гистограмма рассеивания случайных значений *x* (в мкм) отклонений от номинала (*Ø40* мм), размеров обработанных по предложенной технологии отверстий шкивов, и теоретическая кривая *f(x)* распределения этих значений, построенная по уравнению (13), которые хорошо согласуются, подчеркивая тем самым высокий уровень адекватности модели (13) реальному процессу настроенной размерной обработки отверстия шкива привода измельчителя зерноуборочного комбайна «Дон-1500Б».

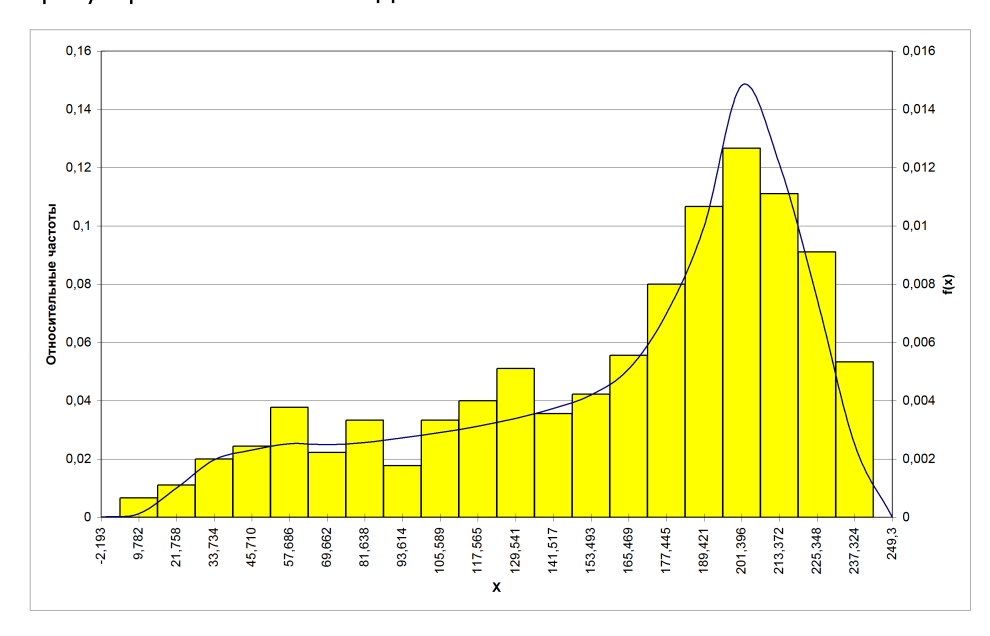


Рис.2. Гистограмма и теоретическая кривая распределения значений *x* шкива при предложенной технологии обработки отверстия

Учитывая, что ни один из шкивов, обработанных зенкерованием с предложенными технологическими нормативами *m* и *T*, не имел размера, выходящего за пределы допуска Ø $40_{0}^{0,25}$ (это видно из гистограммы на рис.2), осуществленное выше управление качеством настроенной размерной обработки является эффективным. Оно не только гарантирует отсутствие брака обработки, но и позволяет на этой основе в течение времени *T* ликвидировать контроль размеров отверстий шкивов, обработанных по такой технологии.

Наконец, рассматривая рис.2, необходимо отметить, что изложенная выше методика моделирования и управления качеством процесса настроенной размерной обработки изделий массового и

серийного производства показывает недопустимость гипотетического принятия нормального распределения случайного значения *x*, полученного такой обработкой, на поле допуска, что до настоящего времени используется в теории точности и в расчетах размерных цепей агрегатов машин. В этих расчетах необходимо использовать динамический закон *f(x)* по (1), числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия [4]) которого существенно отличаются от числовых характеристик нормального закона. Последнее объясняет неточность и недостоверность результатов расчета размерных цепей агрегатов по существующим методикам их статистического анализа.

Библиографический список

1. *Полушкин О.А.* Математическая модель точности автоматизированной размерной обработки изделия. / О.А. Полушкин, Г.И. Каныгин, А.С. Василенко. // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2001. – Т.1. - №1(7). – С.40-47.
2. *Полушкин О.А.* Моделирование точности как средство управления качеством и эффективностью автоматизированной размерной обработки деталей сельхозмашин. / О.А. Полушкин, Г.И. Каныгин, М.А. Бугаевский. // Известия ТулГУ. Серия: Проблемы сельскохозяйственного машиностроения. Вып.1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С.135-141.
3. ГОСТ 25346-89. Единая система допусков и посадок.
4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, гл. редакция физ.-мат. лит-ры, 1969. – 576с.

Материал поступил в редакцию 27.11.08.

O.A. POLUSHKIN

ZERO-DEFECT ITEM MACHINING

Original non-Gaussian distribution of item size values, derived by the qualified tool machining, might be used as a model of such a machining process. By means of this model were obtained the expressions for determination of reclaimable rejects and waste during machining. With the help of these expressions were received the sets of equations for determination of the values and tolerances of the tool setup and tool life. These values guarantee that the machining will be performed without processing defects, thus it is possible to exclude the quality control operation. Also here is proposed the computer-optimized algorithm for calculation of the mentioned above values, and a sample of its practical use.

ПОЛУШКИН Олег Алексеевич (р.1941), заведующий кафедрой «Теория машин и механизмов» ДГТУ, доктор технических наук (1985), профессор (1988). Окончил Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения (ныне ДГТУ) в 1963 г.

Область научных интересов: динамика машин, управление их качеством при проектировании, производстве и эксплуатации на системотехнической основе.
Общее количество публикаций – 156.
grant@mail.ru